

INFLUENCE OF ELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS ON CATHODICALLY PROTECTED GAS PIPELINES

Viliyan Yanakiev, Martin Boyadzhiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: qnakiev91@abv.bg; martinb@mgu.bg

ABSTRACT. Gas transmission systems represent critical infrastructure whose reliability is directly linked to effective corrosion protection. One of the most widely used methods is cathodic protection, where the metal pipe is cathodically polarised by applying an external direct current. Corrosion is an electrochemical process in which the metal oxidises due to current flow between anodic and cathodic regions in the presence of an electrolyte (soil, water). Cathodic protection aims to eliminate these anodic zones through external polarisation.

Modern gas pipelines are often constructed in shared corridors with power lines and railway systems, leading to interactions between electromagnetic fields and cathodic systems. This interaction can result in complex electrochemical phenomena, including accelerated corrosion.

Key words: natural gas, automated control, metering device, energy efficiency.

ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ И ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПОЛЕТА ВЪРХУ ГАЗОПРОВОДИ С КАТОДНА ЗАЩИТА

Вилиян Янакиев, Мартин Бояджиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Газопреносните системи представляват критична инфраструктура, чиято надеждност е пряко свързана с ефективната защита от корозия. Един от най-широко използваните методи е катодната защита (Cathodic Protection, CP), при която металната тръба се поляризира катодно чрез подаване на външен постоянен ток. Корозията е електрохимичен процес, при който металът се окислява вследствие на протичане на ток между анодни и катодни области в присъствието на електролит (почва, вода). Катодната защита цели да елиминира тези анодни зони чрез външна поляризация.

Съвременните газопроводи често се изграждат в общи трасета с електропроводи и железопътни линии, което води до взаимодействие между електромагнитните полета и катодните системи. Това взаимодействие може да доведе до сложни електрохимични явления, включително ускорена корозия.

Ключови думи: природен газ, автоматизирано управление, измервателно устройство, енергийна ефективност.

Въведение

Газопреносните системи представляват критична инфраструктура, чиято надеждност е пряко свързана с ефективната защита от корозия. Един от най-широко използваните методи е катодната защита (Cathodic Protection, CP), при която металната тръба се поляризира катодно чрез подаване на външен постоянен ток.

Корозията е електрохимичен процес, при който металът се окислява вследствие на протичане на ток между анодни и катодни области в присъствието на електролит (почва, вода). Катодната защита цели да елиминира тези анодни зони чрез външна поляризация.

Съвременните газопроводи често се изграждат в общи трасета с електропроводи и железопътни линии, което води до взаимодействие между електромагнитните полета и катодните системи. Това взаимодействие може да доведе до сложни електрохимични явления, включително ускорена корозия.

Принцип на катодната защита

Катодната защита се реализира чрез два основни метода: галванична (с жертвени аноди), с външен източник на ток (impressed current). При втория метод се подава постоянен ток (DC), който понижава потенциала на тръбата до стойности около -0.85 V спрямо Cu/CuSO_4 електрод, което е стандартен критерий за защита.

Основният ефект е: потискане на анодните реакции (разтваряне на метала), създаване на електрично поле в почвата около тръбата, Това поле е стационарно (DC) и намалява с разстоянието от тръбопровода.

Електромагнитни полета около газопроводите

Собствени полета от катодната защита

Катодните станции генерират: електрически полета в почвата и слаби магнитни полета (поради протичащ ток). Тези полета обикновено са нискоинтензивни, локализирани и постоянни. Влиянието им е предимно контролирано и част от нормалната работа на системата.

Външни електромагнитни полета

По-съществено влияние оказват външни източници: високоволтови електропроводи (50 Hz), електрифицирани железници и подстанции. Променливият ток в тези системи създава електромагнитни полета, които могат да индуцират напрежение в тръбопровода чрез индуктивна връзка или проводима връзка. Този процес се нарича AC интерференция.

Механизъм на взаимодействие между AC полета и катодна защита

При наличие на променливо електромагнитно поле възникват индуцирани токове в тръбата. Това води до:

– *Индуцирано напрежение.* Електропроводите могат да индуцират значителни напрежения в тръбопроводите чрез електромагнитна индукция. Фактори за това са разстоянието между трасетата, дължината на паралелно полагане, проводимостта на почвата.

– *AC корозия.* AC-интерференцията е основен фактор за възникване на ускорена локална корозия, известна като AC corrosion. Възниква при дефекти в покритието, локализирана е и може да пробие стената на тръбата. Механизмът ѝ включва: разрушаване на пасивния слой, промяна на pH в интерфейса, нелинейни

електрохимични реакции. Дори при наличие на катодна защита, АС токовете могат да увеличат скоростта на корозия.

– *Влияние върху ефективността на катодната защита.* АС полетата могат да намалят ефективността на СР, да доведат до нестабилен защитен потенциал, да причинят отлепване на покритието. Това води до необходимост от допълнителен контрол и мониторинг.

Блуждаещи токове и електрическо взаимодействие

Блуждаещите токове възникват, когато част от електрическият ток напуска защитената структура и преминава през почвата към други метални обекти. Последствия: корозия на съседни съоръжения, смущения в комуникационни кабели, неравномерна защита. Този процес е особено опасен в урбанизирани зони с висока плътност на инфраструктура

Основни параметри и критерии за оценка

За оценка на влиянието на електромагнитните полета се използват АС напрежение, плътност на АС ток, DC потенциал, съотношение АС/DC. Стандартите препоръчват АС напрежение под 15 V за безопасна експлоатация.

Основният принцип на метода се базира на контролирано изменение на електрохимичния потенциал на защитаваната метална повърхност, така че тя да се превърне изцяло в катод в електрохимичната система. Корозията на металите е резултат от спонтанни анодни и катодни реакции, които протичат в присъствие на електролит. При стоманени тръбопроводи анодната реакция се изразява в разтваряне на желязото. Катодната защита цели да потисне тази реакция чрез подаване на външни електрони към металната конструкция, като по този начин се елиминират анодните зони или тяхната активност се свежда до минимум.

Основният механизъм на катодната защита е промяна на потенциала на металната повърхност в отрицателна посока. Когато потенциалът на стоманата се понижи достатъчно, анодните процеси се прекратяват или значително се забавят. При идеални условия върху повърхността протичат само катодни реакции, най-често редукция на кислород. Така металът се превръща в електрохимично защитен катод.

Катодната защита се реализира чрез два основни подхода:

– *Галванична (жертвена) защита.* При този метод към защитаваната стоманена конструкция се свързва по-активен метал (например цинк, магнезий или алуминий), който играе ролята на анод. Този метал се окислява вместо стоманата. Предимства: проста конструкция; липса на външен източник на енергия; висока надеждност. Недостатъци: ограничен ток на защита; необходимост от периодична подмяна на анодите.

– *Катодна защита с външен ток (Impressed Current CP).* При този метод се използва външен източник на постоянен ток (DC), който подава електрони към тръбопровода чрез инертни или полупостоянни аноди (например графит, титанови аноди с ММО покритие). Чрез регулиране на тока потенциалът на тръбопровода се поддържа в защитен диапазон. Предимства: висока ефективност при големи системи; възможност за регулиране; подходяща за дълги газопроводи.

Недостатъци: зависимост от електрозахранване; по-сложна поддръжка; риск от свръхполяризация.

Един от основните критерии за ефективна защита е потенциалът на тръбопровода, измерен спрямо мед/меден сулфатен електрод. При стандартно приетият защитен потенциал термодинамично се потиска анодното разтваряне на стоманата. Важно е да се отбележи, че този критерий е валиден при отсъствие на значителни влияния от променливи токове (АС интерференция), които могат да изкривят измерванията и реалната защита.

Методи за защита и ограничаване на влиянието

1. *Технически решения* - заземителни системи, дренажни устройства, АС филтри, поляризационни клетки.
2. *Конструктивни мерки* - увеличаване на разстоянието до електропроводи, използване на изолационни фланци, подобряване на покритията.
3. *Мониторинг* - непрекъснат контрол на потенциала, измерване на АС/DC токове, инспекции на покритието.
4. *Разпределение на електрическото поле в почвата.* При работа на катодната защита около тръбопровода се формира стационарно електрическо поле в почвата. Токът протича от анодната система през електролита към защитаваната конструкция.
5. Характеристики на полето - радиално разпространение около тръбата; интензитет, намаляващ с разстоянието; зависимост от съпротивлението на почвата.
6. Това поле е ключово за равномерното разпределение на защитния ток.
7. *Ограничения и влияния на външни фактори.* Ефективността на катодната защита може да бъде повлияна от: електромагнитни полета от електропроводи (АС интерференция), блуждаещи токове от железопътни системи, дефекти в изолационното покритие, нееднородност на почвата. Тези фактори могат да доведат до локални зони на недостатъчна защита или обратна поляризация.
8. *Контрол и оптимизация.* Съвременните катодни системи се управляват чрез постоянен мониторинг на потенциала, автоматична регулация на изходния ток, използване на референтни електроди по трасето, дистанционни системи за контрол и диагностика. Целта е поддържане на стабилна и равномерна защита при променящи се външни условия.

Катодната защита представлява контролирано електрохимично решение за елиминиране на корозията чрез преместване на металната конструкция в катодно състояние. Въпреки своята ефективност, методът изисква внимателно проектиране и постоянен контрол, особено при наличие на външни електромагнитни влияния, които могат да нарушат електрохимичното равновесие.

Анализ на риска

Основните рискове включват ускорена корозия (особено локална), повреди на тръбопровода, опасност за персонала (индуцирани напрежения), отказ на защитната система. Комбинацията от АС и DC ефекти създава сложна нелинейна система, която изисква мултидисциплинарен подход.

Резултати и обсъждане

Извършеният анализ показва, че индуцираното напрежение в газопроводите намалява експоненциално с увеличаване на разстоянието от източника на електромагнитно поле. При разстояния под 20 m се наблюдават най-високи стойности, което създава значителен риск от АС-индуцирана корозия.

В диапазона 20–60 m се отчита съществено намаляване на индуцираните напрежения, но влиянието остава значимо, особено при дълги паралелни участъци. При разстояния над 60–100 m ефектът от електромагнитната индукция е значително отслабен.

Резултатите показват, че не само разстоянието, но и параметри като съпротивление на почвата и качество на изолационното покритие оказват съществено влияние върху риска от корозия.

Анализът потвърждава, че съвместното действие на АС и DC токове води до нелинейни ефекти, които не могат да бъдат оценени чрез стандартни методи за катодна защита и изискват допълнителен мониторинг.

Влияние на електропровод върху газопровод с катодна защита

Разглежда се участък от подземен стоманен газопровод с катодна защита, разположен паралелно на високоволтов електропровод 110 kV. Параметрите на системата са:

- дължина на паралелното трасе: 2.8 km;
- разстояние между трасетата: 15 – 40 m;
- тип катодна защита: с външен ток (Impressed Current CP);
- работен потенциал: $-0.95 \text{ V (Cu/CuSO}_4\text{)}$;
- почва – средна проводимост ($\approx 50 \Omega \cdot \text{m}$).

При полеви измервания са установени следните ефекти:

- *индуцирано АС напрежение*: средни стойности 10–18 V; максимално измерено напрежение 22 V, което надвишава препоръчителната граница от 15 V. Това показва реален риск както от корозия, така и за безопасността на персонала.
- *повишена плътност на АС ток*: измерена е плътност на АС ток в дефекти на покритието до 80 A/m^2 , което надвишава критичната стойност от $\sim 30 \text{ A/m}^2$, след която започва АС корозия
- *локална корозия*. при инспекция (intelligent pig / изкопни проверки) са установени локални питинг корозионни дефекти с дълбочина до 3.5 mm, концентрирани в зоните с най-малко разстояние до електропровода, както и дефекти в изолационното покритие.

Причината за проблема е комбинация от три фактора: електромагнитна индукция (50 Hz), дефекти в покритието и недостатъчно ефективно заземяване. Катодната защита е налична, но не компенсира АС ефекта и създава смесено АС/DC електрохимично поле. Установено е, че при разстояние $< 20 \text{ m}$ има най-висок риск. При дълги паралелни участъци ефектът се акумулира и стандартният CP критерий (-0.85 V) не е достатъчен сам по себе си.

След анализа са внедрени следните решения:

- *заземителна система (gradient control wires)* за намаляване на индуцираното напрежение;
- *поляризационни клетки* за отвеждане на АС ток без загуба на DC защита;

- АС дренажни устройства за контролирано разсейване на индуцирания ток;
- *подобряване на покритието* за намаляване на точките за локална корозия;

В резултат на мерките, АС напрежението намалява под 10 V; АС токовата плътност намалява под 20 A/m^2 ; стабилизира се CP потенциала и не се наблюдават нови корозионни дефекти.

Настоящият пример показва, че дори при наличие на ефективна катодна защита, външните електромагнитни полета могат да предизвикат ускорена локална корозия. Особено критични са случаите на близко и продължително паралелно разполагане на газопроводи и електропроводи. Ефективното управление на риска изисква интегриран подход, включващ както класически методи за катодна защита, така и специализирани средства за ограничаване на АС интерференцията. Анализът на взаимодействието между електромагнитните полета и газопроводите с катодна защита показва, че съвместното въздействие на постоянни и променливи токове създава сложна електрохимична среда с висок риск от локализирана корозия. Особено критични са условията на близко и продължително паралелно разполагане на газопроводи и високоволтови електропроводи, при които индуцираните напрежения и токове могат да достигнат стойности, надвишаващи нормативно допустимите граници. В тези случаи стандартните критерии за катодна защита не гарантират надеждна защита на съоръжението. Реалният експлоатационен опит показва, че АС-индуцираната корозия може да се развие дори при наличие на ефективно функционираща катодна система, което налага преосмисляне на класическите подходи за защита. Ключовият извод е, че катодната защита сама по себе си не е достатъчна при наличие на външни електромагнитни въздействия.

Необходимо е прилагането на интегрирани инженерни решения, включващи: оценка на електромагнитната съвместимост още на етап проектиране; внедряване на системи за ограничаване на АС интерференцията; непрекъснат мониторинг на АС и DC параметрите; използване на интелигентни диагностични и прогнозни модели.

В контекста на нарастващата инфраструктурна плътност и енергийна интеграция, проблемът с електромагнитното влияние върху газопроводите ще става все по-актуален и изисква мултидисциплинарен подход, съчетаващ електротехника, корозионно инженерство и цифрови технологии.

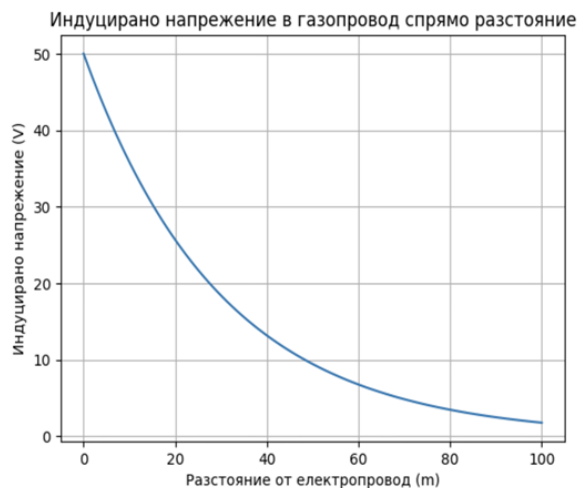
Заклучение

Електрическите и електромагнитните полета оказват съществено влияние върху газопроводите с катодна защита. Докато DC полетата от катодните станции имат защитна функция, външните АС полета могат да компрометират тази защита и да доведат до сериозни корозионни процеси.

Най-същественият проблем е АС-индуцираната корозия, която възниква при взаимодействие между електропроводи и тръбопроводи. За нейното ограничаване е необходимо комплексно инженерно решение, включващо проектиране, мониторинг и активна защита.

Развитието на модели за прогнозиране и интелигентни системи за мониторинг е ключово за бъдещото безопасно управление на газопреносните мрежи.

На фиг. 1 е дадена примерна графика, която показва как индуцираното напрежение в газопровод намалява с увеличаване на разстоянието от електропровод. При малко разстояние (0–20 m) индуцираното напрежение е високо, т.е. рискът е най-голям. В диапазона 20–60 m се наблюдава рязък спад, но все още има влияние. Над 60–100 m ефектът става сравнително слаб.



Фиг. 1. Индуцираното напрежение в газопровод

Литература

БДС 10271-78 Техника на безопасността. Съдове работещи под налягане. Изисквания към бутилките за транспортиране на състени, втечнени и разтворени под налягане газове.

БДС 12961-83 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане. Изисквания към предпазните клапан.

БДС 14397-89 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане основни изисквания към конструкцията.

БДС 14399-89 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане изисквания към измервателните уреди.

БДС 9222-82 Вентили за бутилки за втечнени въглеродородни газове с вместимост от 5 до 80 dm³

БДС EN 1442:2017 Транспортируеми заварени стоманени бутилки за втечен въглеродороден газ (LPG) за многократно проектиране и производство.

Закон за техническите изисквания към продуктите, обн. ДВ. бр. 86 от 1 Октомври 1999 г. изм. ДВ. бр. 66 от 26 Юли 2013 г., изм. ДВ. бр. 68 от 2 август 2013 г.

Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на газовите съоръжения и инсталации за втечнени въглеродородни газове В сила от 23.10.2004 г. Приета с ПМС № 243 от 10.09.2004 г. Обн. ДВ. бр. 82 от 21 Септември 2004 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г.

Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на съоръжения под налягане, в сила от 19.08.2008 г. Приета с ПМС № 164 от 07.07.2008 г. Обн. ДВ. бр. 64 от 18 Юли 2008 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г. 4. БДС 8544-88 Бутилки стоманени за втечнени въглеродородни газове с вместимост от 0,85 до 5.00 dm³.

Hydrogen can be produced by various process technologies. <https://www.entsog.eu/hydrogen>

Hydrogen Infrastructure Map <https://www.h2inframap.eu/>

Oil & Gas Journal, International Petroleum News and Technology. <https://www.ogj.com/>

Pipeline & Gas Journal, International Pipeline & Gas Utility Operations, Design & Maintenance. <https://pgjonline.com/>